

# 지형형태 분류에 의한 산악지형 내 풍력단지 입지평가

## Wind Farm Siting in Mountainous Terrain By Geomorphometric Characterization

김현구\* · 황효정\*\* · 강용혁\*\*\* · 윤창열\*\*\*\* · 정보린\*\*\*\*\* · 송규봉\*\*\*\*\*

Kim, Hyun Goo · Hwang, Hyo Jung · Kang, Yong Heack · Yun, Chang Yeol · Jung, Bi Rin  
Song, Kyu Bong

### 要 旨

한반도와 같은 산악지형에서 풍력단지를 조성할 경우, 인근 지형에 의한 차폐영향이 없기 때문에 상대적으로 풍력 자원이 우수한 능선을 따라서 풍력터빈을 설치하는 것이 유리하다. 본 연구에서는 산악지형에서의 풍력단지 입지 평가를 위하여 SRTM v4.1 3 arc-second 해상도의 수치고도 데이터베이스와 지형형태 분류 프로그램인 LandSerf v2.3을 이용하여 풍력터빈 설치 가능한 능선을 추출하였으며, 강원도에 건설된 강원풍력단지, 태기산풍력단지 및 매봉산풍력단지의 사례분석을 통하여 대부분의 풍력터빈이 상대적으로 풍력자원이 우수한 능선을 따라 배치되었음을 확인함으로써 이 방법의 유효성을 검증하였다.

핵심용어 : 풍력단지입지, 산악지형, 지형형태적 분류, 풍력자원지도

### Abstract

To develop a wind farm in a mountainous terrain like Korea, it is generally more advantageous to install wind turbines along a mountain ridge where has relatively better wind resource because that is open in all directions and free from shielding by the surrounding topography. In this study, the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) v4.1 3 arc-second resolution digital elevation database and the geomorphometric characterization software LandSerf v2.3 are used to extract ridge lines for assessing a wind farm siting in mountainous terrain. The effectiveness of wind farm siting along a ridge line is confirmed that the most of wind turbines in the Gangwon, Taegisan, and Maebongsan wind farms in Korea's mountainous terrain are placed along the primary and secondary ridge lines where wind resource is relatively outstanding.

Keywords : Wind Farm Siting, Mountainous Terrain, Geomorphometric Characterization, Wind Resource Map

### 1. 서 론

전세계적으로 해안 또는 내륙 평지 중 풍력자원이 우수한 지역에서의 풍력개발은 이미 포화상태에 이르렀으며, 이에 따라 해상 및 산악지형으로의 풍력보급이 확대되고 있다(IEA Wind, 2013a). 산악지형에서는 복

잡지형(complex terrain)으로 인한 바람장의 변화가 심하기 때문에 해안 및 평지보다 풍력자원평가의 불확도(uncertainty)가 크다. 그러나 해상에 비하여 우수한 경제성, 상대적으로 낮은 사업위험도 등 월등한 장점이 있기 때문에, 유럽에서는 풍력자원 개발의 범위를 복잡지형으로 확장하기 위하여 이미 복잡지형에 대한 많은

Received: 2014.07.02, revised: 2014.09.16, accepted: 2014.09.22

\* 교신저자 · 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터 책임연구원(Corresponding author, New-Renewable Energy Resource Center, Korea Institute of Energy Research, hyungoo@kier.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터 연구원(Member, New-Renewable Energy Resource Center, Korea Institute of Energy Research, hjhwang@kier.re.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터장(Member, New-Renewable Energy Resource Center, Korea Institute of Energy Research, yhkang@kier.re.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터 선임연구원(Member, New-Renewable Energy Resource Center, Korea Institute of Energy Research, yuncy@kier.re.kr)

\*\*\*\*\* 정회원 · (주)GIS United 팀장(Member, GIS United, Ltd., borin78@gisutd.com)

\*\*\*\*\* 정회원 · (주)GIS United 대표(Member, GIS United, Ltd., mapinsite@gisutd.com)

연구를 수행해오고 있다.

IEA Wind에서 발간한 지난 2009-2013년의 국제공동 연구실적을 보면, Task 31 Benchmarking of Wind Farm Flow Models (WAKEBENCH)에서는 복잡지형에서 유동해석모델의 정확도 평가를, Task 27 Small Wind Turbines at Turbulent Sites에서는 복잡지형 및 고난류(high turbulence) 지역 보급용 소형 풍력발전기 개발을, Task 32 Wind Lidar Systems for Wind Energy Deployment (LIDAR)에서는 복잡지형에서 복잡한 풍속분포를 측정하기 위한 원격탐사 체계개발을 수행하고 있다(IEA Wind, 2013b).

본 연구에서는 이러한 국제적 연구추세에 맞추어, 한반도와 같은 산악지형에서 풍력자원을 개발 할 경우, 지형형태적 분류를 이용함으로써 보다 효과적으로 풍력단지 후보지를 선별할 수 있는 적지분석법을 제안하고자 한다. 즉, 지형자료와 풍력자원자료를 이용하여 분석함으로써, 산악지형에서는 상대적으로 풍력자원이 우수한 능선을 따라 풍력단지가 입지하는 것이 타당함을 검증하였다.

## 2. 연구자료

본 연구에서는 산악지형 내 풍력단지 입지평가 시 핵심적인 평가요소로서 지형형태 및 풍력자원을 분석하였다. 지형형태 분석을 위해서는 DEM(Digital Elevation Models)을, 풍력자원 분석을 위해서는 풍력자원지도도를 이용하였다.

### 2.1 지형자료(terrain data)

본 연구에서는 US NASA를 통하여 무상으로 공급되는 SRTM(Shuttle Radar Topographic Mission) Version 4.1 지형고도자료를 사용하였다(Jarvis et al., 2008). SRTM은 3-arc second의 공간해상도(적도 기준으로 90m)를 갖는 DEM이다.

### 2.2 풍력자원자료(wind resource data)

본 연구에서는 풍력자원자료로서 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원지도(Kim et al., 2013c) 중 풍력자원지도(Kim and Kang, 2012)를 이용하였다. 풍력자원지도는 한반도 전체에 대하여 수평면 공간해상도 100m, 수직방향 공간해상도 10m의 정밀한 풍력자원 3차원 분포를 제공한다.

Fig. 1은 풍력단지 적지분석 시 가장 중요한 사업경제성의 척도인 풍력밀도(wind power density) 분포를 도시한 것이다. 풍력밀도( $P/A$ ,  $W/m^2$ )는 풍력터빈 블레

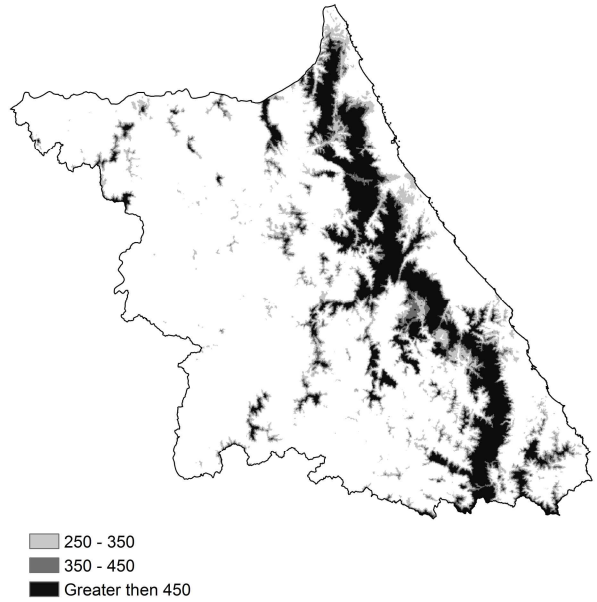


Figure 1. Wind resource map of Gangwon Province (wind power density at 100m above ground level,  $W/m^2$ )

이드(blade)의 회전면적( $A$ ,  $m^2$ )을 통과하는 바람의 풍속( $V$ ,  $m/s$ ) 세제곱에 비례한다. 아래 식 (1)에서  $\rho$ 는 공기밀도( $kg/m^3$ )이다.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1)$$

통상 사전평가 단계에서, 지면고도 100m 높이에서 풍력밀도가  $350W/m^2$  이상이면 풍력발전 사업경제성이 있다고 판단한다.

Fig. 1의 강원도 풍력자원지도로부터 우수한 풍력자원은 거시적으로 지형고도가 높은 산줄기를 따라 분포하고 있으며 미시적으로는 능선을 따라 전개되고 있음을 확인할 수 있다.

## 3. 연구방법

### 3.1 지형형태적 분류

일반적으로 사용되는 지형형태적 분류(geomorphometric characterization)는 지표면의 모든 점들을 평지(Plane), 계곡(Channel), 능선(Ridge), 경로(Pass), 봉우리(Peak), 분지(Pit) 중 하나로 분할하여 분류하는 것이다.

지형형태적 분류에 따른 6가지 형태는 Fig. 2에 표기된 바와 같이 세 직교요소(orthogonal components)의

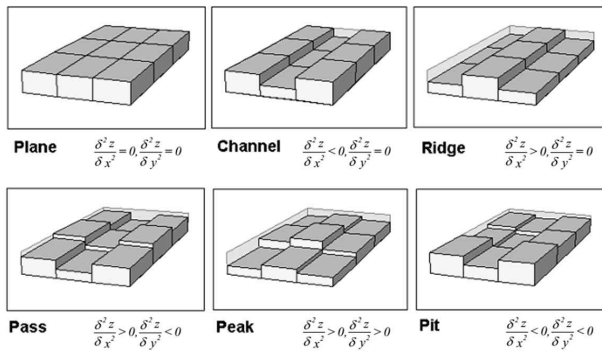


Figure 2. The six geomorphometric feature types and its mathematical definitions

상대적 비율을 사용하여 정의할 수 있다(Wood, 1996). 식에서 x, y는 수평면 좌표축이며 z는 수직 좌표축이다.

본 연구에서는 형태분류를 위해 LandSerf v2.3 공개용 프로그램을 사용하였다(Wood, 2009). 이 프로그램은 지표면을 다음 식과 같이 2차 근사화(quadratic approximation)로 수식화한 후 커널크기(kernel size), 거리감쇄지수(distance decay exponent), 허용경사(slope tolerance), 허용곡률(curvature tolerance) 등의 변수를 조절하여 형태 분류를 수행한다.

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (2)$$

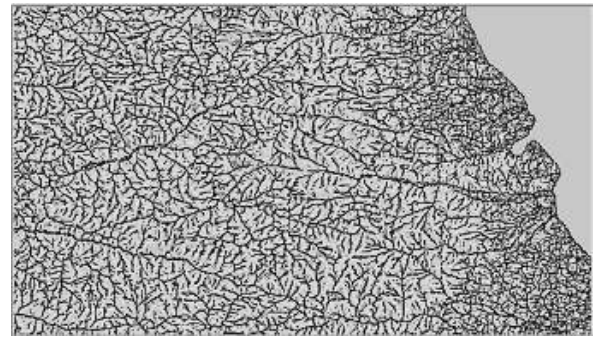
위 식 (2)에서 a, b, c, d, e, f는 지표면의 형태에 따라 결정되는 계수이다.

커널크기는 2차 근사화를 위한 창문(window)의 크기를 결정한다. 본 연구에서는 최소 단위인 3x3으로 설정하였으므로 DEM 3arc second x 3arc second 크기의 셀(cell) 9개가 하나의 커널로 해석되며, 최종적으로 중심의 3arc second x 3arc second 크기의 셀에 대해 지형형태가 판정된다.

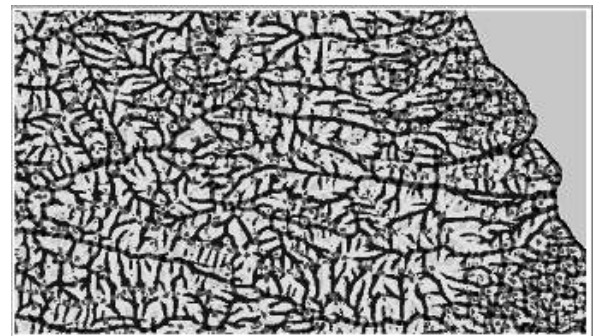
참고로 Fig. 3은 커널크기를 3x3 그리고 9x9로 설정하였을 경우 형태분석 결과의 차이를 대조하여 보여준다. 즉 커널크기가 작을수록 소규모의 지형요소가 더 많이 추출됨을 알 수 있다.

거리감쇄지수는 커널의 중앙부 셀을 가장자리 셀과 어떻게 비교할지를 결정한다. 즉 0은 모든 셀을 동일하게 고려하는 것이고 1은 선형거리감쇄(linear distance decay), 2는 제곱거리감쇄(squared distance decay)를 적용한다. 본 연구에서는 1.0을 사용하였으나 거리감쇄지수 값에 따른 형태분류 결과의 민감도는 매우 낮다.

허용경사는 형태분류 시 적용하는 경사도의 한계값이다. 이 값이 클수록 분류되는 요소(feature)의 수가 증가한다. 본 연구에서는 최대값인 90도를 적용하였다.



(b) kernel size 9x9



(a) kernel size 3x3

Figure 3. Geomorphometric feature network for 3x3 and 9x9 kernel sizes

허용곡률은 지형을 불룩 또는 오목한 형태로 분류하기 위한 기준값이다. 이 값이 클수록 평지분류가 많아지므로 본 연구에서는 산악지형의 특성을 최대한 추출하기 위하여 최소값인 0.1을 적용하였다.

참고로 우리나라의 경우에는 Kim et al.(2012)이 평창을 대상으로 지형형태적 분류에 대한 방법론적 적용 연구를, Tak(2014)이 한반도 적용을 위한 최적변수 설정 연구를 수행한 바 있다.

### 3.2 풍력단지 적지분석

토목공사 측면에서는 풍력자원만 우수하다면 평지에 풍력단지를 건설하는 것이 가장 용이할 뿐 아니라 경제적이다. 특별한 경우에 지형적 특성으로 인하여 계곡 등에 국지풍계가 강하게 형성되기는 하지만, 일반적으로 산악지역에서는 외부로 돌출된 능선이 주위 지형의 차폐영향을 받지 않으므로 풍력자원이 우수하다. 그런데 산지사면을 개발할 경우 지형훼손에 의한 산사태 위험이 증가하므로 산림청 ‘송전시설 등의 자재운반방법 결정기준 및 임시진입로 설계 시공기준’에 의거하여 풍력단지의 입지가 가능한 지형경사도를 규제하고 있다.

임산자원의 효율적 관리를 위해 설치하는 임도 역시 능선을 따라서 개발되는 경우가 많다. 따라서 풍력터빈

설치 시 기존의 임도망을 활용한다면 토목공사가 용이할 뿐 아니라 환경피해를 최소화할 수 있다(Kim et al., 2013b). 봉우리도 동일한 지형적 장점이 있으나 풍력단지 조성하기에는 면적이 제한적이다. 따라서 Fig. 2의 6가지 지형형태 중 풍력단지 입지가 가능한 적지로는 평지 및 능선이라고 판단할 수 있다.

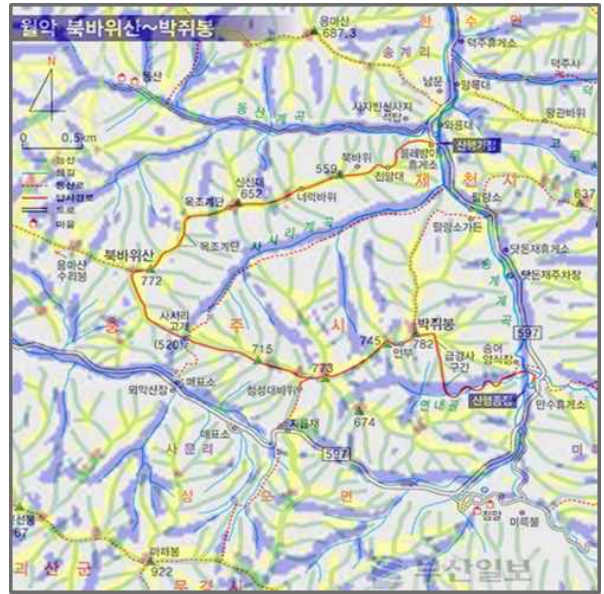
일반적으로 MW급 풍력터빈의 타워(tower) 설치를 위해서는 15m x 15m 면적의 기초공사가 필요하며 풍력터빈 회전자의 작동영역은 지름 80m 이상이 된다. 이는 본 연구에서 설정한 커널 면적인 DEM 9arc second x 9arc second와 상응하는 크기이다.

#### 4. 결과 및 토론

##### 4.1 능선추출 검증

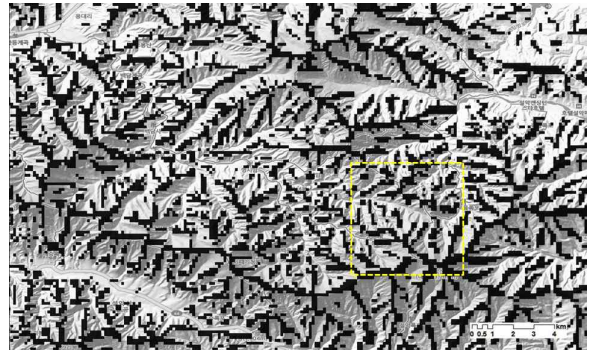
LandSarf를 이용한 지형형태적 분류의 타당성을 검증하기 위하여 남한 산악지형에 대해 능선을 추출하였고, 그 결과를 기존의 능선지도 및 인공위성영상과 비교하였다. 현재 국가기관에서 공개한 능선지도가 없는 관계로 지방자치단체 등에서 등산객의 편의를 위하여 등고선 지도를 이용하여 수기로 제작한 능선지도와 비교하였다.

Fig. 4(a)는 강원도 설악산 공룡능선에서 천불동계곡까지의 기존 능선지도와 LandSarf 분석결과를 중첩한 그림으로, 일부 세부능선 및 계곡에서는 다소간의 불일치가 보이지만 주능선은 두 자료가 정확하게 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)의 충청북도 월악 북바위산에

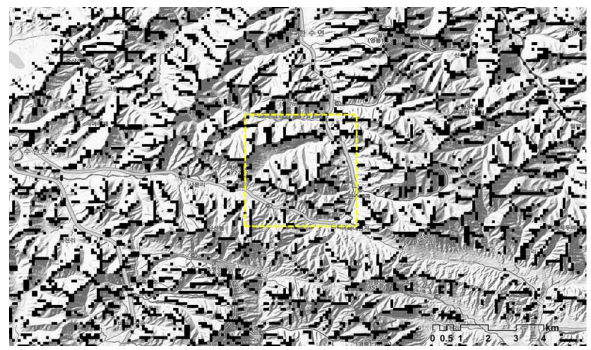


(b) Chungcheong Province, Waraksan

Figure 4. Comparison of extracted ridge lines (blue lines) and the ridge maps derived from contour maps (background)



(a) Gangwon Province, Seorak



(b) Chungcheong Province, Waraksan

Figure 5. Comparison of extracted ridge area (black area) and the satellite images (background)



(a) Gangwon Province, Seorak

서 박쥐봉까지의 능선비교에서도 동일한 경향을 확인할 수 있다.

추가적으로 Fig. 5에 능선 추출의 일치성 확인을 위하여 보다 광역에서 인공위성영상과의 비교를 제시하였다. 참고로 Fig. 5 내부에 표시된 사각형은 Fig. 4의 능선지도와 동일한 영역이다.

기존 능선지도 및 인공위성영상과의 정성적 비교를 통하여 SRTM DEM과 LandSerf를 이용한 능선 추출이 산악지형에서 유효함을 확인할 수 있다. 다만 Figs. 4와 5에서 발견되는 다소간의 불일치는 지형형태적 분류 프로그램의 조절 변수인 커널크기 등의 값에 따라서 다소간의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

#### 4.2 풍력단지 입지평가 검증

우리나라의 대표적인 산악지역인 강원도 소재 대표적인 풍력단지에 대해 실제로 풍력터빈이 능선을 따라 배치되어 있는지를 검증하였다. 이를 통하여 지형형태적 분류에 의해 추출한 능선이 실질적으로 산악지형에서 풍력터빈 설치가 가능한 영역임을 확인하고자 한다. 참고로 풍력터빈의 설치위치는 기하보정 및 정사보정된 아이랑 2호의 1m급 해상도의 위성영상을 사용하여 좌표를 추출하였다.

강원풍력은 강원도 평창군 일대에 조성된 남한 최대 규모의 육상 풍력단지로 2006년 10월에 완공되었다. Vestas V80-2MW 49기가 설치되어 총 설비용량 98MW이며 풍력터빈이 설치된 평균 지형고도는 해발 1,075m이다. Fig. 6(a)에서 확인되었듯이 총 49기의 풍력터빈 중 32기는 해발 1,000m 이상이며 남북으로 뻗은 주능선을 따라서, 15기는 주능선의 서편에 발달한 해발 800m 이상인 능선에 위치하고 있음을 확인하였다.

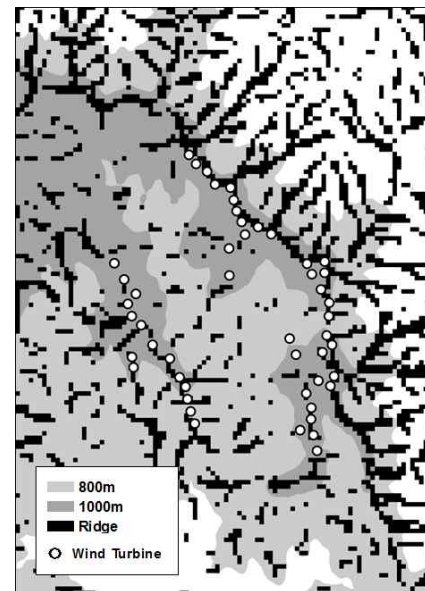
태기산 풍력단지는 강원도 횡성군과 평창군 일대에 조성되어 2008년 11월부터 상업운전에 들어갔다. Vestas V80-2MW 20기가 설치되어 총 설비용량 40MW이며 풍력터빈이 설치된 평균 지형고도는 해발 1,117m이다. 총 20기의 풍력터빈 모두가 남북으로 뻗은 주능선을 따라서 일렬로 설치되었음을 확인할 수 있다(Fig. 6(b)).

매봉산 풍력단지는 강원도 태백시 매봉산 일대에 조성된 풍력단지로 2006년 10월에 완공되었다. 총 9기의 풍력터빈 중 Vestas V80-2MW 1기, Vestas V52-850kW 5기, Gamesa G52-850kW 3기가 설치되어 총 설비용량은 8.8MW이며 풍력터빈이 설치된 평균 지형고도는 해발 1,249m이다. 총 9기의 풍력터빈 모두가 북동에서 남서로 뻗은 주능선을 따라 일렬로 설치되어 있음을 확인하였다(Fig. 6(c)).

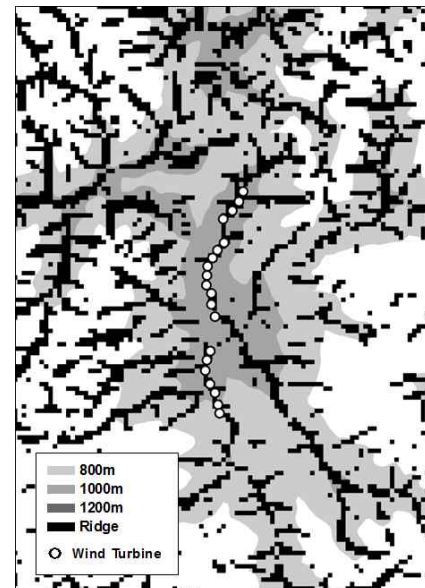
그 외 강원도 영월군 영월 풍력단지 3기, 평창군 대관령 풍력단지 4기, 태기풍력 2기도 모두 주능선에 설치되어 있음을 확인하였다.

한편 Fig. 7은 태기산 풍력단지 일대의 풍력자원지대로, 풍력밀도의 분포형태가 지형고도에 따라 비례하는 특성을 보여주고 있다. 주위보다 지형고도가 높은 능선, 특히 풍력터빈이 일렬로 설치된 주능선의 풍력밀도가 가장 높게 나타나고 있다.

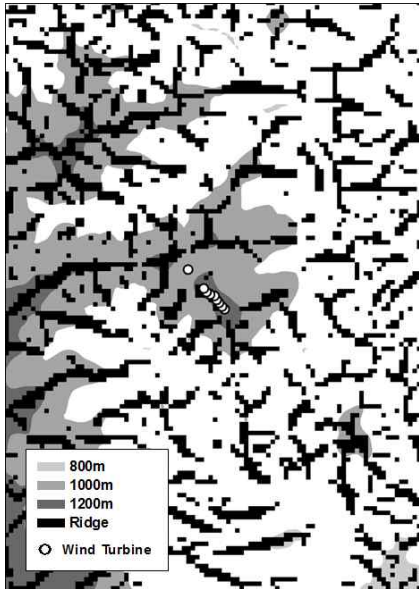
풍력단지 입지평가지 풍력자원(Fig. 7), 지형형태(Fig. 6(b))와 함께 반드시 사회·환경적 요인을 고려하여야 한다. Fig. 8은 태기산 풍력단지 일대의 지형경사



(a) Gangwon wind farm



(b) Taegisan wind farm



(c) Maebongsan wind farm

Figure 6. Wind turbine layouts at wind farms in mountainous terrain

도 20도 이상인 영역, 생태자연 1등급지 등 환경규제 영역 그리고 도로, 주거지 등 기타 배제요인을 나타낸 배제지도이다(Kim et al., 2014).

풍력자원, 지형형태 및 사회·환경적 배제요인을 모두 고려하여 최종적으로 풍력단지 입지가 가능한 영역은 Fig. 8에서 배제요인이 없는 흰색 영역 중 Fig. 7의 풍력밀도가 상대적으로 가장 높아 발전수익을 최대화 할

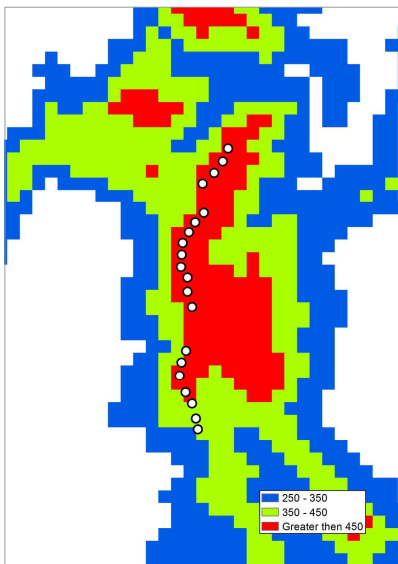


Figure 7. Wind resource map around the Taegisan wind farm(wind power density,  $W/m^2$ )

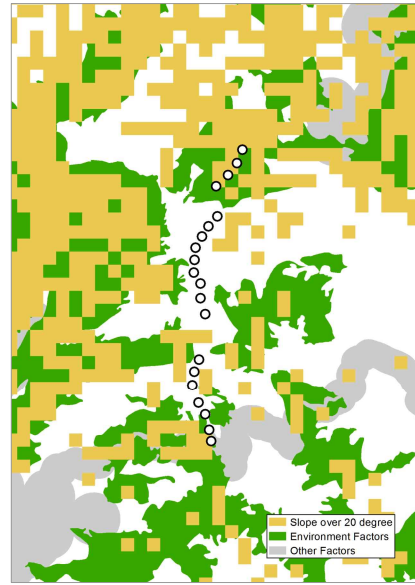


Figure 8. Exclusion map for wind farm construction around the Taegisan wind farm

수 있는 위치이며, 이는 Fig. 6(b)의 능선 위치와 일치함을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

강원도 풍력자원지도를 보면 고산지대, 특히 지형형태 중 능선을 따라서 우수한 풍력자원이 전개되고 있다. 따라서 산악지형에서 풍력단지를 개발할 경우, 상대적으로 풍력자원이 우수한 능선을 따라서 풍력터빈을 배치함으로써 발전수익을 최대화 할 수 있기 때문에, 강원도에 건설된 대부분의 풍력단지 내 풍력터빈은 능선을 따라 배치되었음을 지형형태적 분류 및 풍력자원지도를 이용하여 검증하였다.

향후 산악지형에서의 풍력단지 입지평가 시 풍력자원지도와 함께 풍력터빈 설치가 가장 용이한 평지와 풍력자원이 가장 우수한 능선 등 특정한 지형형태를 선택적으로 고려함이 타당하다고 판단된다.

현재 육상 풍력자원 잠재량 산출 시 지형형태적 특성에 대한 별도의 고려가 없었으나(Kim, 2008; Kim et al., 2013a), 본 연구결과에 따르면 산악지형에서는 지형형태 중 평지와 능선을 선택적으로 고려하여야 실질적으로 보급가능한 잠재량 산출이 가능할 것이라고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다. (B4-2425)

### References

1. IEA Wind, 2013a, IEA WIND 2012 annual report, ISBN 0-9786383-7-9, p. 172.
2. IEA Wind, 2013b, End-of-term report 2009-2013 and Strategic Plan 2014-2019, p. 57.
3. Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., Guevara, E., 2008, Hole-filled SRTM for the globe version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>)
4. Kim, H. G., 2008, Preliminary estimation of wind resource potential in south korea, J. of the Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 6, pp. 1-7.
5. Kim, D. E., Seong, Y. B., Sohn, H. G., Choi, K. H., 2012, Landform classification using geomorphons, J. of the Korean Geomorphological Association, Vol. 19, No. 4, pp. 139-155.
6. Kim, H. G., Kang, Y. H., 2012, The 2010 wind resource map of the korean peninsular, J. of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 16, No. 4, pp. 167-172.
7. Kim, H. G., Hwang, H. J., Kang, Y. H., 2013a, Evaluation of onshore wind resource potential according to environmental conservation value assessment, J. of Environmental Science International, Vol. 22, No. 6, pp. 717-721.
8. Kim, H. G., Hwang, H. J., Kang, Y. H., Yun, C. Y., 2013b, Evaluation of onshore wind resource potential according to the road proximity, J. of The Korean Society for New and Renewable Energy, Vol. 9, No. 4, pp. 13-18.
9. Kim, H. G., Kang, Y. H., Jo, D. K., Yun, C. Y., 2013c, New&renewable energy resource map service, Wind Energy Journal, Vol. 4, No. 1, pp. 5-9.
10. Kim, E. Y., Jeon, S. W., Kim, Y. H., Lee, J. W., Song, W. K., Kim, H. G., 2014, Site selection and potential analysis using the frame for assessing environmentalfriendly wind power plant, J. Korean Environmental Restoration Technology, Vol. 17, No. 4, pp. 17-27.
11. Tak, H. M., 2014, Optimal variable establishment for using geomorphons in korean peninsula, J. of the Korean Geomorphological Association, Vol. 21, No. 1, pp. 165-183.
12. Wood, J. D., 1996, The geomorphological characterisation of digital elevation models Ph.D. Thesis, University of Leicester, UK, p.185.
13. Wood, J. D., 2009, The LandSerf manual, City University, London, p. 213.